

DOI: 10.7667/PSPC161884

考虑储能和需求侧响应的微网光伏消纳能力研究

彭政, 崔雪, 王恒, 周斌

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 在光伏发电迅速发展的情况下, 分布式光伏的消纳成为人们关注的热点。构建了含有分布式光伏、储能系统以及需求侧响应的光伏微网系统。以光伏发电消纳量最大为首要目标, 同时考虑微网系统的用电成本, 并加入功率平衡、微网可靠性、储能系统功率上下限、需求侧响应以及光伏出力界限等约束条件。为了对比分析储能和需求侧响应对微网光伏消纳的影响, 设立不考虑储能系统和需求侧响应、只考虑储能系统、只考虑需求侧响应、同时考虑储能系统和需求侧响应4种情景, 使用改进帝国竞争算法解决约束条件较多的问题。通过对比发现, 借助储能系统和需求侧响应能够有效地提高微网中分布式光伏的消纳率, 同时也保证了微网用电的经济性。

关键词: 光伏微网; 光伏消纳; 储能系统; 需求侧响应; 帝国竞争算法; 经济性

Research on the accommodation of photovoltaic power considering storage system and demand response in microgrid

PENG Zheng, CUI Xue, WANG Heng, ZHOU Bin

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In the case of the rapid development of distributed photovoltaic, the absorption of photovoltaic power has become an issue of concern. This paper establishes a microgrid system containing photovoltaic, energy storage system and demand response. The primary target is to maximize the absorption of photovoltaic power, and also considers minimizing the cost of power using. It sets several constraints for the objective function, including power balance, reliability of the microgrid, power bound of energy storage system, demand response and limit of photovoltaic output. In order to analyze the effects of energy storage and demand response on the absorption of photovoltaic, it sets four scenes including not considering energy storage system or demand response, only considering energy storage system, only considering demand response, considering both energy storage system and demand response. It uses the modified MICA to solve the problem of too many constraints. By comparison, it finds that using energy storage system and demand response can improve the absorption of photovoltaic power and also ensure the economic benefits at the same time.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177112).

Key words: photovoltaic microgrid; absorption of photovoltaic; energy storage system; demand response; MICA; economic benefits

0 引言

在能源日益短缺和环境不断恶化的大背景下, 可再生能源的开发和应用成为必经之路。而光伏发电作为新能源中最为丰富且受地域限制较少的发电形式, 发展尤为迅速。中国作为光伏发展最快的国家之一, 政府也相继出台了一系列的相关政策支持和鼓励光伏发电的发展^[1]。但是由于光伏发电具有

间歇性和波动性等特点, 接入电网给电力系统的安全稳定运行造成了一定的影响, 所以大规模的光伏并网和消纳比较困难, 弃光现象比较严重。因此, 对于如何促进光伏发电并网和消纳的研究具有极其重要的现实意义。

国内外相关学者对这些领域都进行了积极有效的探讨和研究。文献[2]为了解决大规模光伏发电并网消纳容量的计算问题, 提出了一种重点考虑网络传输约束和抽水蓄能电站的消纳分析模型; 文献[3]采用了基于电压灵敏度的随机情景模拟的方法, 进

基金项目: 国家自然科学基金(51177112)

行配电网光伏消纳能力的评估；文献[4]以小型户用分布式光伏发电并网系统为研究对象，以减小该光伏并网系统入网功率的间歇性和波动性为目标，对其进行储能容量配置；文献[5]基于某一系统的馈线，结合当地的实际负荷以及光伏电站的容量，建立随机情景，通过对比仿真，验证了储能系统对提高馈线的光伏消纳能力的有效性；文献[6-7]介绍了目前国内外关于需求侧响应的研究现状，介绍了需求侧响应的种类和方法，分析了需求侧响应对于系统运行的作用，并针对我国目前需求侧响应的发展提出了建议；文献[8]在峰谷分时电价下，构建了基于电价电量弹性矩阵的用户多时段电价响应模型，并提出了分时电价下储能系统的充放电策略以及光伏微网的优化运行策略；文献[9]分析了引入需求侧响应对微网的经济效益和储能容量配置的影响。

上述研究的共同点在于只是单纯地考虑储能和需求侧响应对于光伏消纳的作用，而没有将两者各自的作用和两者的综合作用进行对比分析。本文针对目前应用比较广泛的分布式光伏微网系统，其特点是光伏发电自发自用^[10]，为了验证储能系统 and 需求侧响应对于提高微网系统光伏消纳能力的作用，设立了不考虑储能系统和需求侧响应、只考虑储能系统、只考虑需求侧响应、同时考虑储能系统和需求侧响应 4 种情景^[11]，采用改进的帝国竞争算法，通过对比分析得出对光伏消纳促进作用最大的方案。

1 光伏发电出力模型

光伏发电是利用半导体界面的光生伏特效应将太阳能直接转换成电能。而光伏发电的输出功率会随着光照强度和环境温度等因素的变化而变化，具有一定的随机性和波动性。

在此，光伏输出功率根据标准额定条件(太阳辐射强度 G_{STC} 为 1000 W/m^2 ，相对大气光学质量为 AM1.5，环境温度 T_{STC} 为 25°C)下的输出功率、光照强度和环境温度得到

$$P_p = P_{STC} \frac{G_c}{G_{STC}} [1 + k(T_c - T_{STC})] \quad (1)$$

式中： P_{STC} 为在标准额定条件下的光伏额定输出功率； G_c 为工作点的光照强度； k 为功率温度系数； T_c 为工作点的环境温度。

2 光伏微网模型

光伏微网系统主要由分布式光伏、储能系统以及负荷构成，负荷包括主要可转移负荷和其他负荷，微网系统的结构如图 1 所示^[10,12]。本文构建的光伏

微网实行“自发自用，电网调剂”的运行策略，即光伏发电直接供本地负荷使用，当光伏发电不足时，从电网购电，满足微网内的负荷需求。

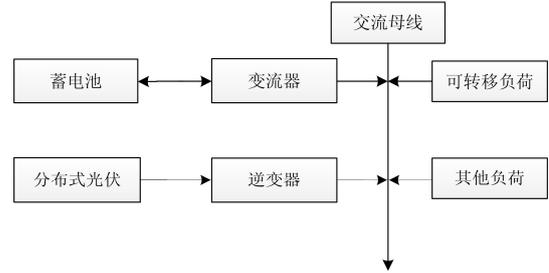


图 1 微电网结构图

Fig. 1 Structure of microgrid

3 储能系统充放电模型

在电力生产过程中，电能的生产、输、配、用几乎是同时进行的，这种同时性在很大程度上影响着电力系统的规划、建设、调度运行以及控制。而储能系统在发电侧的应用则打破了这种供需同时性的限制，其灵活的功率吞吐功能可以有效地减小峰谷差，抑制新能源发电的反负荷特性，促进新能源的消纳和电网的安全稳定运行^[13]。储能系统具有电源和负荷的双重特性，在低负荷时段，储能系统能够作为负荷将电能特别是多余的新能源发电量储存起来；而在高负荷时段，储能系统又可以将之前储存的电能释放出来，为电力系统供电，减少电力系统的供电压力。

在同一时段里，储能系统的充电与放电无法同时进行，即 $P_{S,t}^+$ 和 $P_{S,t}^-$ 满足：

$$P_{S,t}^+ \cdot P_{S,t}^- = 0 \quad (2)$$

式中， $P_{S,t}^+$ 和 $P_{S,t}^-$ 分别为 t 时刻储能系统的充电功率和放电功率。

当分布式光伏出力大于负荷的时候， $P_{S,t}^+ \geq 0$ ， $P_{S,t}^- = 0$ ；

当分布式光伏出力小于负荷的时候， $P_{S,t}^- \geq 0$ ， $P_{S,t}^+ = 0$ 。

4 需求侧响应模型

电力需求侧响应是指为了提高系统整体的经济性和可靠性，在满足用户基本电能使用的同时降低电力消耗，通过改变用户原有的用电模式、提高终端的用电效率以及降低终端的电能消耗量等手段对用户终端的电能使用进行控制。

而随着电力市场的成熟度越来越高，需求侧响应的形式也越来越多样化，总体上分为价格型需求

响应和激励型需求响应两大类。本文研究的需求侧响应主要是考虑可转移负荷的作用。

可转移负荷主要是根据供需双方事先签订好的协议, 由调度中心向用户发出信号, 将用电高峰时期的某些比较灵活的负荷转移到用电低谷期或者新能源出力的高峰期, 经过用户的响应之后, 主动转移部分负荷, 按照协议用户会得到一定的费用补偿, 其补偿费用为

$$C^{DR} = \sum_{t=1}^N \rho L_{in,t} = \sum_{t=1}^N \rho L_{out,t} \quad (3)$$

式中: ρ 为可转移负荷的补偿系数; $L_{in,t}$ 为 t 时刻转入的负荷量; $L_{out,t}$ 为 t 时刻转出的负荷量。

当分布式光伏出力大于负荷的时候, $L_{in,t} \geq 0$, $L_{out,t} = 0$;

当分布式光伏出力小于负荷的时候, $L_{out,t} \geq 0$, $L_{in,t} = 0$ 。

5 综合模型

5.1 目标函数

在含有分布式光伏发电的综合经济调度中, 光伏发电消纳量最大、系统运行成本最低和系统煤耗最小是几种常见的优化模型。本文以光伏消纳量最大和系统运行成本最低为优化目标, 建立一个包含分布式光伏、储能装置和需求侧响应的微网综合优化调度模型。

一般而言, 系统以最大限度地消纳光伏发电为首要目标, 因此将目标函数设置为

$$\min[-\sum_{t=1}^N (P_{L,t} + P_{S,t}^+) + \varepsilon \sum_{t=1}^N (eP_{N,t} + \rho L_{in,t})] \quad (4)$$

式中: N 为调度周期时刻数; $P_{L,t}$ 为 t 时刻负荷直接消纳的光伏出力; $P_{S,t}^+$ 为 t 时刻储能系统消纳光伏出力的充电功率; e 为从电网购电的电价, 本文取 600 元/MWh; $P_{N,t}$ 为 t 时刻需要从电网购买的电量; ε 为惩罚因子, 引入系统的运行成本可在光伏出力消纳最大化时, 将优化问题转化为经济调度问题。 ε 取值过大会使目标函数中运行成本的影响比重大于光伏消纳量, 过小则会使运行成本的影响比重过小以至于可以忽略不计, 本文优先考虑光伏消纳, 因为 e 取 600 元/MWh, ρ 取 10 元/MWh, 所以仿真算例中 ε 取 10^{-3} , 从而使运行成本的影响因子小于 1, 而又不至于过小。

若 $P_{p,t} \geq L_t$, $P_{L,t} = L_t$; 若 $P_{p,t} < L_t$, $P_{L,t} = P_{p,t}$ 。所以 t 时刻负荷直接消纳的光伏电能 $P_{L,t} = \min(P_{p,t}, L_t)$, L_t 为 t 时刻的负荷。

$$L_t = L_t^0 - L_{out,t} + L_{in,t} \quad (5)$$

若 $P_{p,t} \geq L_t$, $P_{N,t} = 0$; 若 $P_{p,t} < L_t$, $P_{N,t} = L_t - P_{p,t} - P_{S,t}^-$ 。

5.2 约束条件

5.2.1 功率平衡约束

$$P_{p,t} + P_{N,t} + P_{S,t}^- = L_t^0 - L_{out,t} + L_{in,t} + P_{S,t}^+ \quad (6)$$

5.2.2 微网可靠性约束

为了保证微网在离网运行时可以达到稳定运行时间的要求, 且储能系统能够储存的总电能受到系统容量的限制, 所以储能系统 t 时刻所储存的电能需满足

$$S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max} \quad (7)$$

式中: S_{\min} 为微网离网运行时, 为保证光伏微网内重要负荷^[14]稳定运行 0.5 h 所需配置的最小储能容量; S_{\max} 为储能系统最大容量。

5.2.3 储能系统功率约束

储能系统充电与放电的实时功率受到一定的上限约束, 满足

$$0 \leq P_{S,t}^+ \leq P_{S,t,\max}^+ \quad (8)$$

$$0 \leq P_{S,t}^- \leq P_{S,t,\max}^- \quad (9)$$

式中, $P_{S,t,\max}^+$ 和 $P_{S,t,\max}^-$ 分别为 t 时刻储能系统的充电功率上限和放电功率上限。

储能系统的充电功率还受到光伏出力和负荷的影响:

$$P_{S,t}^+ \leq P_{p,t} - L_t \quad (10)$$

储能系统的放电功率还受到系统剩余电能的影响:

$$P_{S,t}^- \leq S_t - 1 \quad (11)$$

5.2.4 网络安全约束

电网各支路潮流需在限值之内。

$$P_{B,i}^{\min} \leq P_{B,i,t} \leq P_{B,i}^{\max} \quad (12)$$

式中: $P_{B,i,t}$ 为支路 i 在时刻 t 的潮流; $P_{B,i}^{\max}$ 、 $P_{B,i}^{\min}$ 分别为支路 i 潮流的上界和下界。

5.2.5 需求侧响应约束

需求侧响应通过改变用户的用电模式、提高终端的用电效率和降低终端的电能消耗, 形成虚拟发电机组, 参与系统调度。

可转移负荷的限值约束为

$$0 \leq L_{in,t} \leq L_{in}^{\max} \quad (13)$$

$$0 \leq L_{out,t} \leq L_{out}^{\max} \quad (14)$$

式中: L_{in}^{\max} 为 t 时刻可转入负荷的上限值; L_{out}^{\max} 为 t 时刻可转出负荷的上限值。

一个调度周期内，总的转入负荷量应该等于总的转出负荷量：

$$\sum_{t=1}^N L_{in,t} = \sum_{t=1}^N L_{out,t} \quad (15)$$

5.2.6 光伏出力约束

$$0 \leq P_{p,t} \leq P_p^{\max} \quad (16)$$

式中， P_p^{\max} 为光伏有功出力的最大值。

5.3 模型求解

为了解决光伏消纳过程中约束较多的问题，本文采用了改进的帝国竞争算法。帝国竞争算法是一种模拟人类政治社会在殖民地阶段各帝国相互竞争并通过占领殖民地扩大自己势力的一种全局优化算法，分为创建初始国家、同化和革命三个过程。首先通过创建初始国家随机生成一系列的国家，并将这些按照势力大小分为帝国和殖民地，然后通过同化和革命过程对生成的初始国家进行迭代优化，最后选出势力最大的帝国参数作为最优解^[15]。传统的帝国竞争算法处理约束较多的问题时，收敛速度较慢。为了在优化过程中不陷入局部最优，对算法进行了一定的改进。现以创建初始国家为例，说明改进的方法和步骤，如图 2 所示，增加了光伏出力是否大于原有负荷、一个周期内转入负荷总量是否等于转出负荷总量两个判断条件。

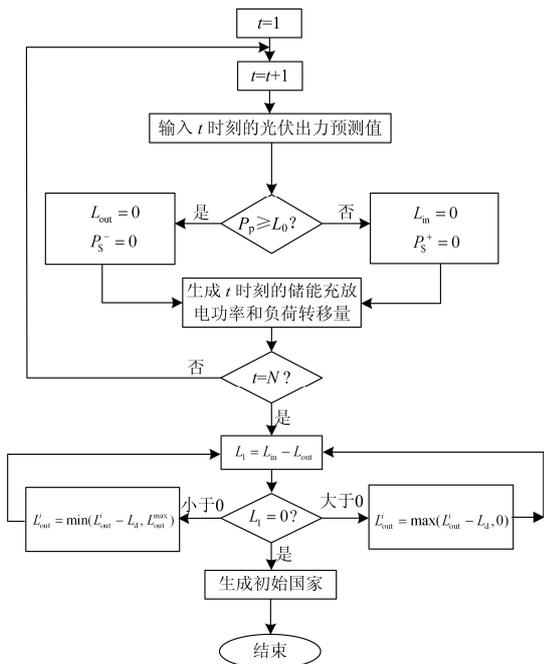


图 2 创建初始国家流程图

Fig. 2 Flowchart of creating initial empire

在同化和革命的过程中也进行了相应类似的改进，这使得变量始终在约束的范围之内，保证了结

果的可行性和收敛的迅速性。

6 算例分析

6.1 基础数据

本文以某光伏微网为例，通过所设立的 4 种情景的对比，分析加入储能和需求侧响应之后微网的光伏消纳率以及购电费用，来验证本文所建立模型的正确性和有效性。分布式光伏装机容量为 20 MW。

储能系统 and 需求侧响应的相关参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 储能系统参数

S_{\max} / MWh	S_{\min} / MWh	$P_{S,t,\max}^+$ / MW	$P_{S,t,\max}^-$ / MW
20	1	6	6

表 2 需求侧响应参数

L_{in}^{\max} / MW	L_{out}^{\max} / MW	ρ
2	2	10

分布式光伏出力预测值和典型日负荷曲线如图 3 所示，可以发现 8~17 时光伏出力远远超过负荷量，20 时左右为负荷高峰时期，而此时的光伏出力已经降为零。

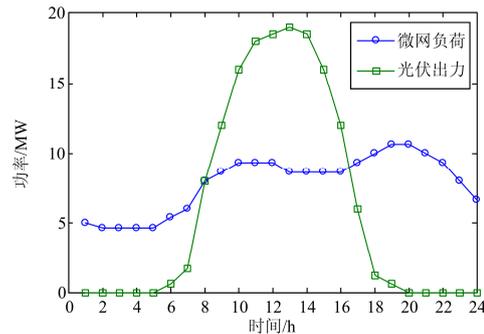


图 3 光伏出力和日负荷曲线

Fig. 3 Photovoltaic output and daily load curve

6.2 光伏微网优化调度分析

为了研究储能系统 and 需求侧响应对微网光伏消纳的影响，设立了 4 个情景进行对比优化分析，如表 3 所示。

表 3 情景划分

情景	储能系统	需求侧响应
1	×	×
2	×	√
3	√	×
4	√	√

表 4 为不同情景下微网优化调度的结果。对比 4 种情景下的优化调度结果可知, 储能和需求侧响应的引入可以在一定程度上提高微网的光伏消纳

率, 有效地减小光伏发电的弃光量, 同时减少从电网购电的电量, 从而降低微网运行所需要的成本。

表 4 四种情景下的优化调度结果

Table 4 Results of dispatching optimization under four scenarios

情景	最大净功率/MW	最小净功率/MW	购电电量/MW	购电费用/元	光伏消纳率/%	目标函数值
1	10.4	-10.6	99.1	59 460	60.09	-29.54
2	9.2	-9.7	91.5	54 870	64.91	-48.03
3	10.4	-10.6	81.0	48 600	71.58	-60.07
4	9.2	-10.4	76.5	45 910	77.98	-72.46

6.2.1 储能系统结果分析

对比情景 1 和情景 3 可知, 引入储能系统将微网的光伏消纳率从原先的 60.09% 提高到了 71.58%, 从大电网购电的电量从原先的 99.1 MW 降到了 81.0 MW, 购电费用从原先的 59 460 元降到了 48 600 元, 意味着储能系统一个调度周期可以为微网运行节省 1.086 万元的支出。而对比情景 2 和情景 4 发现, 在引入需求侧响应的情况下, 储能系统对于微网光伏消纳率的提高更为明显, 从原先的 64.91% 提高到了 77.98%。但是储能系统的建造和运行需要一定的成本, 合理配置储能系统将更大限度地提高微网运行的经济性和可靠性。

情景 4 中, 一个调度周期内, 储能系统的充放电情况如表 5 所示。

表 5 储能系统充放电结果

Table 5 Charging and discharging results of energy storage system

t	1	2	3	4	5	6
$P_{S_r}^+ / \text{MW}$	0	0	0	0	0	0
$P_{S_r}^- / \text{MW}$	0	0	0	0	0	0
t	7	8	9	10	11	12
$P_{S_r}^+ / \text{MW}$	0	0	0.1	0.9	5.6	6.0
$P_{S_r}^- / \text{MW}$	0	0	0	0	0	0
t	13	14	15	16	17	18
$P_{S_r}^+ / \text{MW}$	5.9	0.6	0	0	0	0
$P_{S_r}^- / \text{MW}$	0	0	0	0	3.4	5.5
t	19	20	21	22	23	24
$P_{S_r}^+ / \text{MW}$	0	0	0	0	0	0
$P_{S_r}^- / \text{MW}$	1.1	1.6	2.2	0.1	0.3	0.4

由表 5 可知, 当白天光伏出力大于负荷的时候, 储能系统进行充电, 达到最大容量 20 MW 时就停止充电; 当晚上光伏出力逐渐降为零的时候, 储能系统就进行放电, 供负荷使用, 不足的电量从电网购买, 当储能量降到 1 MW 时就停止放电。通过这个过程将白天多余的光伏出力储存起来供晚上使用,

以此来消纳白天多余的光伏出力并减少晚上从电网购买的电量, 从而降低微网运行成本。

6.2.2 需求侧响应结果分析

对比情景 1 和情景 2 可知, 引入需求侧响应将微网的光伏消纳率从原先的 60.09% 提高到了 64.91%, 从大电网购电的电量从原先的 99.1 MW 降到了 91.5 MW, 购电费用从原先的 59 460 元降到了 54 870 元, 意味着需求侧响应一个调度周期可以为微网节省 4590 元的支出。而对比情景 3 和情景 4 发现, 在已经配置了储能系统的前提下, 引入需求侧响应对于微网光伏消纳率的提高更为明显, 从原先的 71.58% 提高到了 77.98%。

情景 4 中, 一个调度周期内, 负荷转移的情况如表 6 所示。

表 6 需求侧响应结果

Table 6 Results of demand response

t	1	2	3	4	5	6
L_{in} / MW	0	0	0	0	0	0
L_{out} / MW	0	0.5	0.6	1.5	1.3	0
t	7	8	9	10	11	12
L_{in} / MW	0	0	0.2	1.3	1.8	0.4
L_{out} / MW	0.2	0	0	0	0	0
t	13	14	15	16	17	18
L_{in} / MW	2.0	0.7	1.7	0	0	0
L_{out} / MW	0	0	0	0.4	0	0.7
t	19	20	21	22	23	24
L_{in} / MW	0	0	0	0	0	0
L_{out} / MW	1.1	0.2	0.3	0	1.5	0.5

由表 6 可知, 当晚上光伏出力逐渐降为零的时候, 正好又是一个周期内的负荷高峰时期, 这时候进行负荷转出; 当白天光伏出力大于负荷的时候, 进行负荷转入。通过这个过程将晚上高峰时期的一部分负荷转移到白天光伏出力大于负荷的时期, 以此来消纳白天多余的光伏出力并减少需要从电网购

买的电量,从而降低了分布式光伏微网的运行成本。

情景4中,需求侧响应前后的负荷曲线和光伏出力如图4所示。

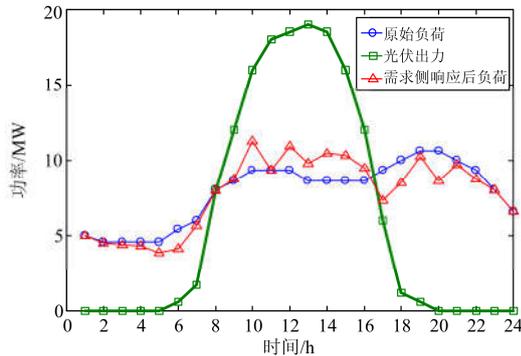


图4 光伏出力和需求侧响应前后日负荷曲线

Fig. 4 Photovoltaic output and daily load curve before and after demand response

由图4可以看出,引入需求侧响应之后,通过负荷转移,将晚上光伏出力为零时的一部分负荷转移到白天光伏出力远远大于负荷的时候,使光伏出力除去负荷的净功率变小,使负荷曲线在时序上更加贴近光伏出力曲线,更加接近微网光伏发电“自发自用”的首要目标。

7 结论

本文为了解决微网中分布式光伏的消纳问题,提出了引入储能和需求侧响应的方法。为了验证储能和需求侧响应对于提高光伏消纳率的作用,设立了4种情景,通过对比分析进行验证。结果表明:

1) 储能系统的引入能够大幅度地提高微网的光伏消纳率,减少需要从电网购买的电量,降低微网系统的运行成本。

2) 需求侧响应的引入也能够一定程度上提高微网的光伏消纳率,同时可以改变负荷结构,使负荷曲线在时序上更加贴近光伏发电曲线,降低光伏发电的净功率,更加接近光伏发电“自发自用”的首要目标。

3) 同时引入储能系统和需求侧响应可以使二者对提高光伏消纳率的作用更为明显,比二者单独作用时的效果更佳。但是储能系统的建设和运行需要一定的成本,负荷转移也需要对用户进行一定的费用补偿,所以合理配置储能容量以及需求侧响应可以更大限度地提高微网的光伏消纳率并降低其运行成本,实现微网运行的经济性和可靠性。

参考文献

[1] 胡静,黄碧斌,李琼慧,等.我国分布式光伏发电政策

实施效果评价[J].供用电,2016,33(5):80-84.

HU Jing, HUANG Bibin, LI Qionghui, et al. Evaluation on implementation policy for distributed photovoltaic power generation in China[J]. Distribution and Utilization, 2016, 33(5): 80-84.

[2] 赵波,包侃侃,徐志成,等.考虑需求侧响应的光储并网型微电网优化配置[J].中国电机工程学报,2015,35(21):5465-5474.

ZHAO Bo, BAO Kankan, XU Zhicheng, et al. Optimal sizing for grid-connected PV-and-storage microgrid considering demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5465-5474.

[3] 欧阳聪,刘明波.考虑网络传输约束的并网光伏发电消纳容量计算[J].电力系统保护与控制,2016,44(5):17-23.

OUYANG Cong, LIU Mingbo. Computing of accommodation capacity of grid-integrated photovoltaic generation considering network's transmission constraints[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 17-23.

[4] 徐志成,赵波,丁明,等.基于电压灵敏度的配电网光伏消纳能力随机场景模拟及逆变器控制参数优化整定[J].中国电机工程学报,2016,36(6):1578-1587.

XU Zhicheng, ZHAO Bo, DING Ming, et al. Photovoltaic hosting capacity evaluation of distribution networks and inverter parameters optimization based on node voltage sensitivity[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1578-1587.

[5] 李路遥.分布式光伏发电并网系统混合储能容量配置研究[D].上海:上海交通大学,2014.

LI Luyao. Research on the configuration of the hybrid energy storage system in the grid-connected distributed PV system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.

[6] 赵波,韦立坤,徐志成,等.计及储能系统的馈线光伏消纳能力随机场景分析[J].电力系统自动化,2015,39(9):34-40.

ZHAO Bo, WEI Likun, XU Zhicheng, et al. Photovoltaic accommodation capacity determination of actual feeder based on stochastic scenarios analysis with storage system considered[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 34-40.

[7] 伍伟华,庞建军,陈广开,等.电力需求侧响应发展研究综述[J].电子测试,2014,1(3):86-94.

WU Weihua, PANG Jianjun, CHEN Guangkai, et al. Research on development of electric power demand side

- response[J]. *Electronic Test*, 2014, 1(3): 86-94.
- [8] 全生明. 需求侧响应资源的经济性分析与市场均衡模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- QUAN Shengming. Analysis and research for economy and market equilibrium model of demand side response resources[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [9] 周楠, 樊玮, 刘念, 等. 基于需求响应的光伏微网储能系统多目标容量优化配置[J]. *电网技术*, 2016, 40(6): 1709-1716.
- ZHOU Nan, FAN Wei, LIU Nian, et al. Battery storage multi-objective optimization for capacity configuration of PV-based microgrid considering demand response[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(6): 1709-1716.
- [10] 陈丽丽, 牟龙华, 刘仲. 光储柴微电网运行特性分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(12): 86-91.
- CHEN Lili, MU Longhua, LIU Zhong. Analysis of the operating characteristics of a PV-Diesel-BESS microgrid system[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(12): 86-91.
- [11] 宋艺航, 谭忠富, 李欢欢, 等. 促进风电消纳的发电侧、储能及需求侧联合优化模型[J]. *电网技术*, 2014, 38(3): 610-615.
- SONG Yihang, TAN Zhongfu, LI Huanhuan, et al. An optimization model combining generation side and energy storage system with demand side to promote accommodation of wind power[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(3): 610-615.
- [12] 刘东冉, 陈树勇, 马敏, 等. 光伏发电系统模型综述[J]. *电网技术*, 2011, 35(8): 47-52.
- LIU Dongran, CHEN Shuyong, MA Min, et al. A review on models for photovoltaic generation system[J]. *Power System Technology*, 2011, 35(8): 47-52.
- [13] FENG Lin, ZHANG Jingning, LI Guojie, et al. Cost reduction of a hybrid energy storage system considering correlation between wind and PV power[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1: 9pp. DOI 10.1186/s41601-016-0021-1
- [14] 许健, 刘念, 于雷, 等. 计及重要负荷的工业光伏微电网储能优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(9): 29-37.
- XU Jian, LIU Nian, YU Lei, et al. Optimal allocation of energy storage system of PV microgrid for industries considering important load[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(9): 29-37.
- [15] HOSSEINI S, AL KHALED A. A survey on the Imperialist competitive algorithm metaheuristic: implementation in engineering domain and directions for future research[J]. *Applied Soft Computing*, 2014, 24: 1078-1094.

收稿日期: 2016-11-11; 修回日期: 2017-02-15

作者简介:

彭政(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与分析; E-mail: 405958512@qq.com

崔雪(1974—), 女, 通信作者, 副教授, 研究方向为电力系统运行与分析。E-mail: xue_cui_whu@163.com

(编辑 魏小丽)